

引文格式: 王文辉, 黄翔, 孟亚云, 等. 面向飞机蒙皮对缝的移动机器人自主跟踪方法 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 76-82.

WANG Wenhui, HUANG Xiang, MENG Yayun, et al. A mobile robot autonomous tracking method for aircraft skin seam[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 76-82.

面向飞机蒙皮对缝的移动机器人自主跟踪方法

王文辉, 黄翔, 孟亚云, 鲁小翔, 李根

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

【摘要】 提出一种面向飞机蒙皮对缝的移动机器人自主跟踪方法, 用以解决大型蒙皮上表面装配对缝的自动化测量问题。移动机器人包括对缝测量模块和运动控制模块, 对缝测量模块在测量对缝间隙阶差的同时得到机器人相对于对缝的位姿, 运动控制模块控制机器人自主调姿。基于双线结构光与对缝的相对位置关系, 提出机器人在不同情况下的自主调姿方法, 解决了机器人在运动过程中与对缝产生偏差时的自主调姿问题。通过试验表明移动机器人对缝自主跟踪的位置误差为 5.81mm, 角度误差为 3.52°。

关键词: 蒙皮对缝; 双线结构光; 自主跟踪; 运动控制; 相对位姿

A Mobile Robot Autonomous Tracking Method for Aircraft Skin Seam

WANG Wenhui, HUANG Xiang, MENG Yayun, LU Xiaoxiang, LI Gen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In order to solve the problem of automatically measuring the assembly seams on large skins surface, a mobile robot autonomous tracking method for aircraft skin seam is proposed. The mobile robot includes a seam measurement module and a motion control module. The seam measurement module obtains the posture of the robot relative to the seam while measuring the gap and flush. The motion control module controls the robot to adjust position automatically. Based on the relative position between the dual linear structured light and the seam, an autonomous robot position adjustment method in different situations is proposed, which could solve the problem of autonomous position adjustment when the robot deviated from the seam. The experimental results show that the position error of the mobile robot for the autonomous tracking of the seam is 5.81mm and the angle error is 3.52°.

Keywords: Skin seam; Dual linear structured light; Autonomous tracking; Motion control; Relative pose

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.076

飞机蒙皮^[1]在飞机骨架结构外且用铆钉固定于骨架上, 蒙皮直接与空气接触, 不仅起着承载和传递气动载荷^[2]的作用, 还需要承受一定的剪流, 所以要求蒙皮具有较大的承载力和刚度。飞机蒙皮面积较大且形状复杂, 不可能实现整体加工, 所以飞机蒙皮一般由很多面积较小的结构装配而成, 进而形成许多装配对缝, 这些装配对缝的存在会对飞机的气动和隐身性能造成影响^[3]。因此必须对这些装配形成的对缝进行测量, 确认其是否满足装配精度的要求。

传统的蒙皮对缝测量方法是操作人员利用塞尺测

量对缝^[4]。但是大型蒙皮的上表面面积大, 装配对缝数量多^[5]。如果利用塞尺测量这些对缝, 操作人员需要站立在蒙皮的上表面, 这样会使蒙皮发生变形, 因此对大型蒙皮上表面的装配对缝进行测量十分困难。这种操作人员利用塞尺的测量方法稳定性差、随机误差大, 测量结果与技术人员的经验、责任心密切相关, 对操作人员的要求较高。因此需要一套可以测量对缝间隙阶差并且自主跟踪对缝特征的测量系统来代替人工检测。

近年来, 国内外研究人员对飞机蒙皮对缝跟踪技术有诸多研究。天津大学王志江等^[6]提出基于视觉的

机器人对缝纠偏控制系统,但需通过观察对缝中心与机器人的相对位置调整机器人位姿。北京航空航天大学许大帅等^[7]提出基于 iGPS 的对缝定位,在线结构光传感器测算对缝的同时,利用 iGPS 对传感器进行定位,但只能得到对缝的位置信息,难以实现自主跟踪测量。Mueller 等^[8]将蒙皮的三维点云数据与二维图像中像素点一一对应,检测出每个对缝区域的点云数据,在扫描得到大量的点云数据中,不能准确、高效地提取对缝区域。

针对上述问题,本文提出了一种面向飞机蒙皮对缝的机器人自主跟踪方法。机器人采用精度高且便携的双线结构光测量方法和灵活性好的车轮式移动方式。机器人包括对缝测量模块和运动控制模块。对缝测量模块在测量对缝间隙阶差的同时得到机器人相对于对缝的位姿,传输到运动控制模块中控制机器人自主调姿,实现对缝的自主跟踪。

1 移动机器人

1.1 结构与硬件组成

移动机器人如图 1 所示,机器人采用 3 层架构式,其外形尺寸为 300mm × 220mm × 220mm。NVIDIA Jetson TX2 开发板安装在上底盘上,STM32 单片机^[9]、BTN7971 驱动板和蓄电池依次安装在机器人的中间底盘上。工业相机和两激光器固定在中间底盘与下底盘之间的安装板上。

1.2 通讯原理

移动机器人的通讯原理如图 2 所示,机器人包括对缝测量模块和运动控制模块。

工业相机获取对缝处的激光光条图像,传输到 NVIDIA Jetson TX2 开发板中。NVIDIA Jetson TX2 开发板对光条图像进行处理^[10],一方面测量对缝的间隙阶差,另一方面得到机器人相对于对缝的位姿,然后通过串口^[11]将相对位姿发送到 STM32 单片机。STM32 单片机发送 PWM 波到驱动板,驱动电机控制麦克纳姆轮^[12]转动,调整机器人位姿。

2 对缝自主跟踪

2.1 对缝跟踪模型

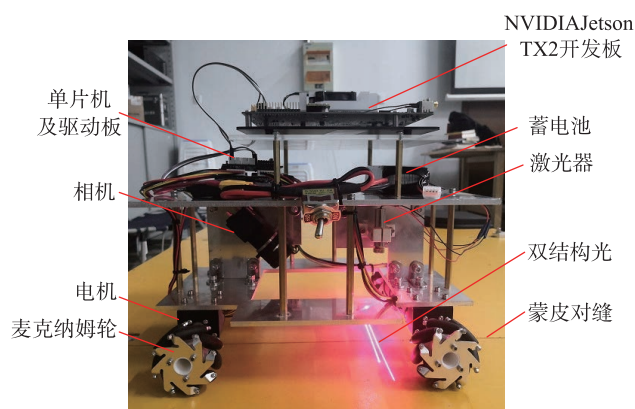
当机器人在水平方向左右移动时,相机采集到的图像中对缝的位置会随之移动。因大型蒙皮的上表面曲率较小,故可以忽略由蒙皮曲率变化造成对缝在相机 Z 轴方向的位置变化。因此,图像上对缝特征点的偏移^[13]代表了机器人相对于对缝的偏移。

在机器人运动的过程中应保证机器人中心线与对缝方向一致,避免机器人在运动过程中由于误差导致所采集的图像中激光光条未检测到缝,从而对机器人跟踪

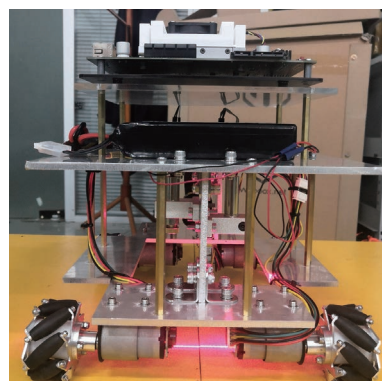
对缝产生影响。当机器人中心线与对缝方向一致时,对缝位于图像中心位置,此位置光条效果较两侧更好,图像处理精度更高^[14]。

通过以上分析,构建如图 3 所示的移动机器人对缝跟踪模型。

由图 3 可知,在机器人跟踪对缝的过程中,机器人相对于对缝的位姿包括两部分,一部分是机器人中心



(a) 正视图



(b) 侧视图

图1 移动机器人结构图

Fig.1 Mobile robot structure diagrams

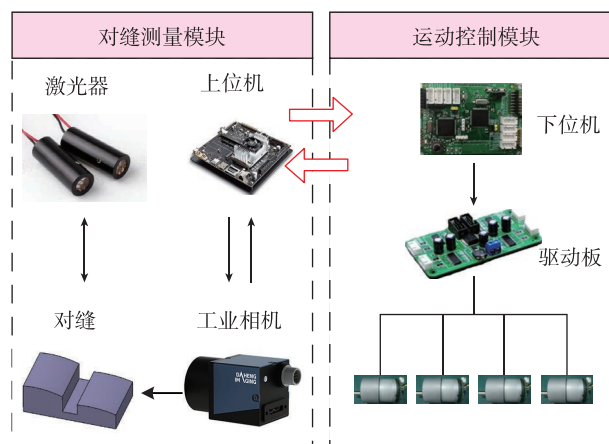


图2 通讯原理图

Fig.2 Communication schematic

线相对于对缝轨迹的偏角,用 θ 表示;另一部分是机器人中心线与对缝之间的距离,用 l 表示。 O 点为机器人的几何中心, a 和 b 分别表示机器人几何中心 O 点与两光条的距离, d 表示机器人中心线两侧激光光条的长度。

对机器人相关尺寸进行测量可知,几何中心 O 点距离两光条的距离 a 和 b 分别为65mm和70mm,机器人中心线两侧激光光条的长度 d 为70mm。

2.2 自主调姿方法

在机器人运动的过程中,机器人中心线与对缝会出现偏差,产生偏差的原因有如下3点:

(1) 机器人位于初始位置时,由于初始位置的随机性,机器人中心线与对缝之间的相对位置关系不能得到保证;

(2) 在机器人运动的过程中,对缝的轨迹会发生变化,从而造成机器人中心线与对缝之间产生偏差;

(3) 在机器人运动过程中产生误差,导致其中心线偏离对缝方向。

由于上述原因,要求机器人在跟踪对缝的过程中可以调节其相对于对缝的位姿。根据图像中激光光条检测到对缝的不同情况,研究机器人的自主调姿方法分为双缝、单缝和无缝3种。

2.2.1 双缝

当机器人某一时刻相机所采集到的图像中激光光条检测到双缝,说明此时对缝轨迹之间有一锐角转角。此时,在相机所采集的图像中对缝与光条的相对位置关系有两种,如图4所示。

以图4(a)为例,详细描述机器人在检测到双缝时的调姿方法,调姿示意图如图5所示。

移动机器人根据对缝相对于图像中心的位置,向左或向右运动 l ,使对缝位于图像中心,如图5(b)所示。

根据 θ 与 90° 的大小关系,若 $\theta > 90^\circ$,则控制机器人逆时针转动 $270^\circ \sim \theta$,如图5(c)所示。同理,若 $\theta < 90^\circ$,则控制机器人顺时针转动 $90^\circ + \theta$ 。由于图像中心不是机器人的旋转中心,所以在转动之后机器人中心线方向与对缝方向相同,但图像中心并不在对缝处。

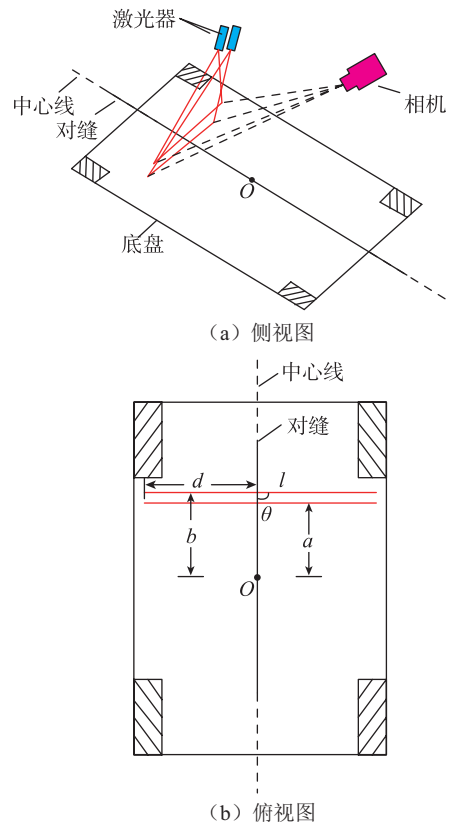
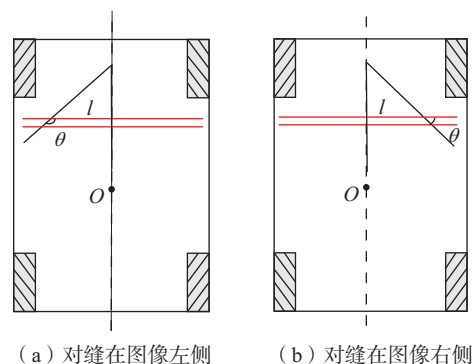


图3 机器人对缝跟踪模型

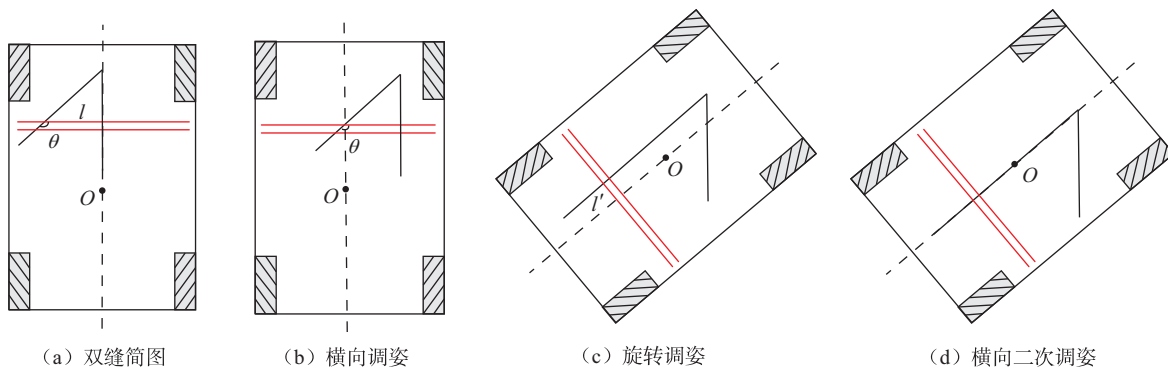
Fig.3 Robot seam tracking model



(a) 对缝在图像左侧 (b) 对缝在图像右侧

图4 双缝检测简图

Fig.4 Double seam detection diagrams



(a) 双缝简图

(b) 横向调姿

(c) 旋转调姿

(d) 横向二次调姿

图5 双缝调姿

Fig.5 Double seam posture adjustment

由几何关系可知,逆时针转动之后对缝位于机器人中心线的右侧,对缝与机器人中心线距离 $l'=b\sin(\theta-90^\circ)$,控制机器人右移 $b\sin(\theta-90^\circ)$,如图 5 (d)所示。同理,顺时针转动之后对缝位于机器人中心线的左侧,对缝与机器人中心线距离 $l'=b\sin(90^\circ-\theta)$,控制机器人左移 $b\sin(90^\circ-\theta)$ 。从而保证机器人中心线与对缝方向一致。

2.2.2 单缝

当机器人某一时刻相机所采集到的图像中激光光条检测到单缝。此时存在两种情况:第 1 种是机器人位于初始位置,由于放置位置的不确定性导致激光光条与对缝之间有一定的偏差;第 2 种是对缝轨迹之间存在一钝角转角,相机在某次采集图像的过程中拍摄到了钝角转角的另一条边。

在初始位置时,相机所采集的图像中对缝与光条的相对位置关系有 4 种,如图 6 所示。在对缝轨迹之间存在钝角转角时,相机所采集的图像中对缝与光条的相对位置关系有两种,如图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知,在机器人位于钝角转角时,检测到缝的两种情况与初始位置时的情况相同。在初始位置和钝角转角两种情况下可采用相同的调姿方法。以图 6 (a)为例,详细描述机器人在检测到单缝时的调姿方法,调姿示意图如图 8 所示。

移动机器人根据对缝的左右位置,若对缝在左侧,则向左运动 l ,如图 8 (b)所示。同理,若对缝在图像的右侧,则控制机器人向右运动 l ,使对缝位于图像中心。

根据 θ 与 90° 的大小关系,若 $\theta > 90^\circ$,则控制机器人顺时针转动 $\theta \sim 90^\circ$,如图 8 (c)所示。同理,若 $\theta < 90^\circ$,则控制机器人逆时针转动 $90^\circ \sim \theta$ 。由于图像中心不是机器人的旋转中心,所以在转动之后机器人中心线方向与对缝方向相同,但图像中心并不在对缝处。

由几何关系可知,顺时针转动之后对缝位于机器人中心线的左侧,对缝与机器人中心线距离 $l'=b\sin$

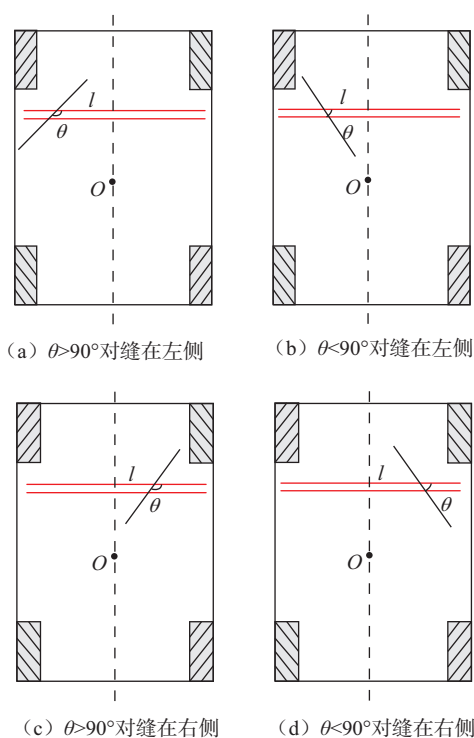


图6 初始位置简图

Fig.6 Initial position diagrams

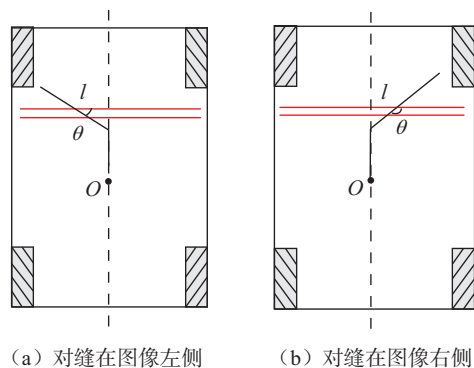


图7 单缝检测简图

Fig.7 Single seam detection diagrams

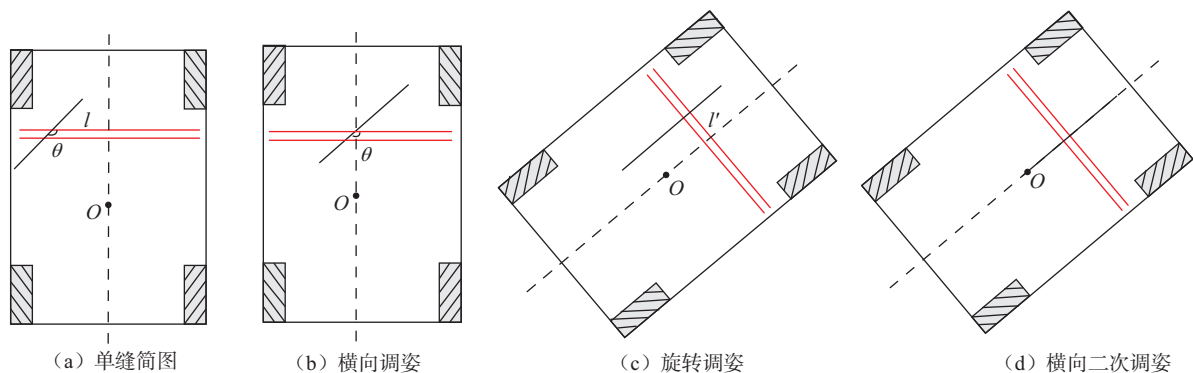


图8 单缝调姿

Fig.8 Single seam posture adjustment

($\theta-90^\circ$),控制机器人左移 $b\sin(\theta-90^\circ)$,如图 8(d)所示。同理,逆时针转动之后对缝位于机器人中心线的右侧,对缝与机器人中心线距离 $l'=b\sin(90^\circ-\theta)$,控制机器人右移 $b\sin(90^\circ-\theta)$,保证机器人中心线与对缝方向一致。

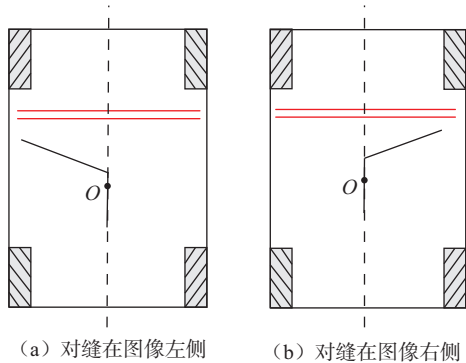
2.2.3 无缝

当机器人某一时刻相机所采集到的图像中激光光条未检测到缝。此时存在两种情况,第 1 种是对缝轨迹之间存在一钝角转角,由于机器人前一次前进距离过大导致此次拍摄的图像中光条未检测到缝。第 2 种是对缝轨迹之间存在一个直角转角。

当对缝轨迹之间为钝角转角时,相机所采集的图像中对缝与光条的相对位置关系有两种,如图 9 所示。在对缝轨迹之间为直角转角时,相机所采集的图像中对缝与光条的相对位置关系也有两种,如图 10 所示。

由图 9 和图 10 可知,机器人位于钝角转角时与直角类似,可采用相同的调姿方法。以较复杂的钝角转角图 9(a)为例,详细描述机器人未检测到缝时的调姿方法。

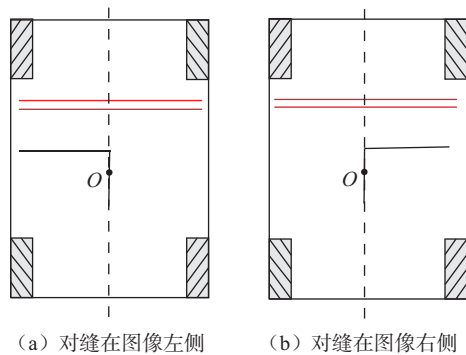
控制机器人逆时针转动 90° ,采集一次图像。若检测到缝,如图 11(a)所示;若仍未检测到缝则说明对缝不在机器人的逆时针方向,然后控制机器人顺时针转动 180° ,如图 11(b)所示。



(a) 对缝在图像左侧 (b) 对缝在图像右侧

图9 钝角无缝检测简图

Fig.9 Obtuse angle seamless detection diagrams



(a) 对缝在图像左侧 (b) 对缝在图像右侧

图10 直角无缝检测简图

Fig.10 Right angle seamless detection diagrams

在机器人旋转寻缝后,光条检测到单缝,下一步可按单缝调姿方法进行调整位姿。

2.3 对缝跟踪流程

机器人运动流程如图 12 所示。

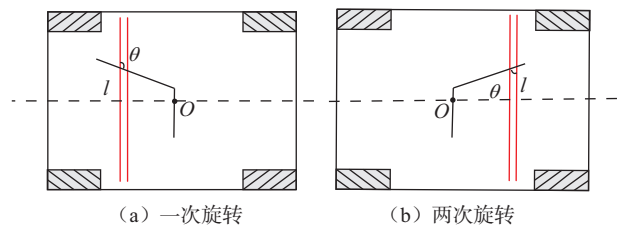
步骤 1: 调姿。将机器人放到初始位置,打开开关,进行单缝调姿。

步骤 2: 运动。控制机器人直线运动,采样距离为 50mm。

步骤 3: 判断是否检测到缝。由采集到的图像判断机器人是否检测到缝。若无缝,跳转至步骤 4;若有缝,跳转至步骤 5。

步骤 4: 旋转寻缝。若机器人采集的图像中没有对缝,进行旋转寻缝。

步骤 5: 判断检测到缝的类型。若机器人采集的图



(a) 一次旋转 (b) 两次旋转

图11 旋转寻缝

Fig.11 Rotary seam finding

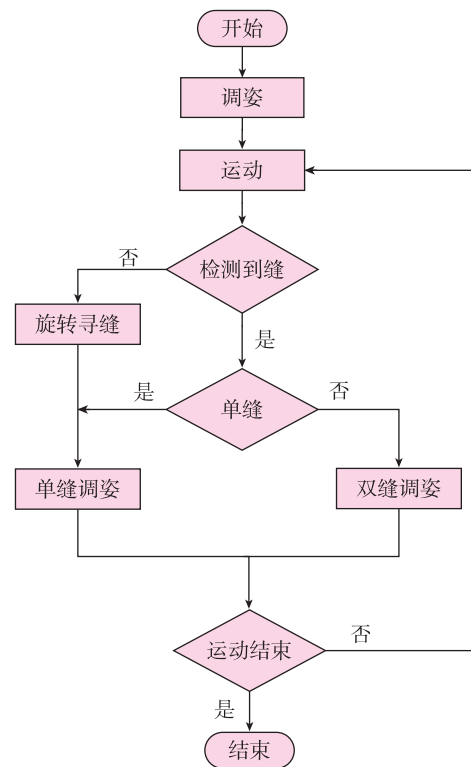


图12 机器人运动流程图

Fig.12 Robot motion flow chart

像中有对缝,判断对缝的类型。若为单缝,跳转至步骤6;若为双缝,跳转步骤7。

步骤6:单缝调姿。按单缝调姿的方法进行调姿。

步骤7:双缝调姿。按双缝调姿的方法进行调姿。

步骤8:判断运动是否结束。若机器人未运动结束,跳转至步骤2。若机器人运动结束,则停止运动。

3 试验及结果分析

3.1 试验平台

为验证移动机器人对缝跟踪精度,搭建图13所示的对缝跟踪试验平台。试验平台中,模拟件根据大型蒙皮上表面装配对缝中,形状最复杂、轨迹最长的飞机机翼与翼盒装配后形成的对缝轨迹特征设计加工形成。

模拟件表面上的对缝轨迹为锯齿形,分别有 50° 、 100° 和 90° 3种不同类型的转角。其中每条锯齿边的长为350mm,两条短直角边长为700mm,底边边长为1600mm。将机器人放置到图13所示位置。

3.2 试验数据及误差分析

在机器人沿模拟件上对缝运动的过程中,机器人中心线与对缝距离 l 的理论值为0,激光光条和对缝夹角 θ 的理论值为 90° 。但是在实际的对缝跟踪过程中,机器人与对缝总会存在误差。用机器人中心线与对缝距离 l 与0的差值表示机器人的位置误差;激光光条和对缝的夹角 θ 与 90° 的差值表示机器人的角度误差。

记录机器人每次采集的图像中其中心线与对缝之间的距离 l 以及激光光条与对缝的夹角 θ 。根据试验结果绘制图14所示的误差分布曲线。

在图14中,第1次测量为初调姿。由于初始位置的不确定性,当机器人位于初始位置时,机器人中心线与对缝的位置误差以及激光光条与对缝的角度误差都较大。此次试验中,初始位置时测量得到的距离为 -46.51mm ,角度为 68.53° 。

第5次测量得到的距离为 53.23mm ,角度为 168.64° 。由于距离和角度都有很大误差,说明此时到达钝角转角。

第13次测量未得到数据,第14次测量得到的距离为 46.20mm ,角度为 105.35° 。说明机器人进行了一次旋转寻缝,对缝在逆时针方向。由于位置误差较大,说明此时到达钝角转角。

第21、22次测量未得到数据,第23次测量得到的距离为 -51.39mm ,角度为 76.62° 。说明机器人进行了两次旋转寻缝,对缝在顺时针方向。由于位置误差较大,说明此时到达钝角转角。

第30次测量未得到数据,第31次测量得到的距离为 38.42mm ,角度为 104.15° 。说明机器人进行了一次

旋转寻缝,对缝在逆时针方向。由于位置误差较大,说明此时到达钝角转角。

第38次测量得到两组数据,说明到达锐角转角。其中较偏处对缝测量得到的距离为 23.50mm ,角度为 43.31° 。

第53、54次测量未得到数据,第55次测量得到的距离为 5.41mm ,角度为 92.38° 。说明机器人进行了两次旋转寻缝,对缝在顺时针方向。由于位置误差较小,说明此时到达直角转角。

第88、89次测量未得到数据,第90次测量得到的

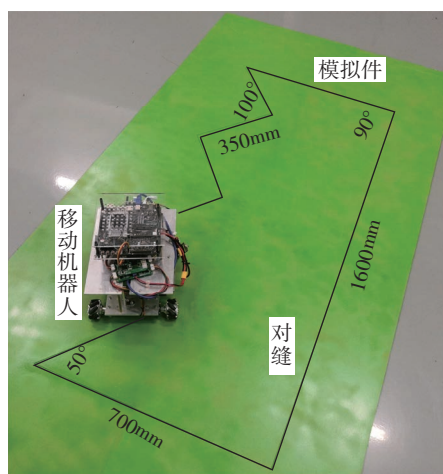


图13 对缝跟踪试验平台

Fig.13 Seam tracking experimental platform

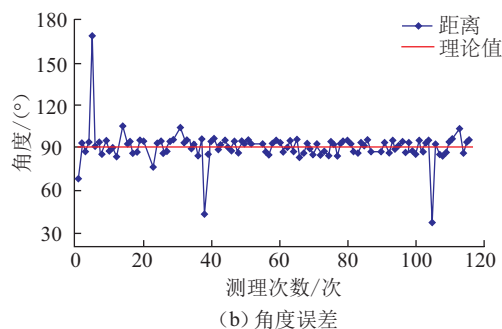
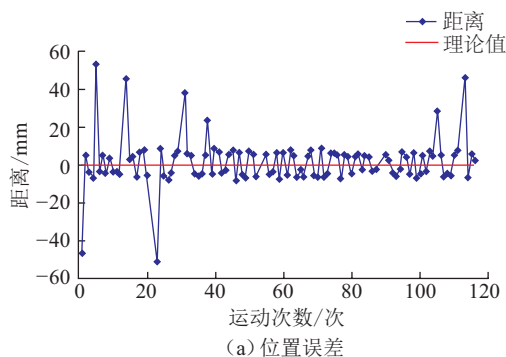


图14 误差分布图

Fig.14 Error distribution

距离为 5.38mm, 角度为 87.72°。说明机器人进行了两次旋转寻缝, 对缝在顺时针方向。由于位置误差较小, 说明此时到达直角转角。

第 105 次测量得到两组数据, 说明到达锐角转角。其中较偏处对缝测量得到的距离为 28.48mm, 角度为 36.47°。

第 112 次测量未得到数据, 第 113 次测量得到的距离为 46.22mm, 角度为 103.95°。说明机器人进行了一次旋转寻缝, 对缝在逆时针方向。由于位置误差较大, 说明此时到达钝角转角。

由试验结果可知, 经初调姿后, 机器人沿对缝直线运动时的误差较小。由于对缝轨迹发生变化, 机器人在调姿时的位置误差和角度误差较大。在不考虑调姿误差的情况下, 机器人直线运动的位置误差为 5.81mm, 角度误差为 3.52°。

4 结论

本文针对大型蒙皮上表面装配对缝的自动化测量问题, 提出了一种面向飞机蒙皮对缝的移动机器人自主跟踪方法。

(1) 对机器人的结构、硬件组成与通讯原理进行了简单的介绍。机器人采用 3 层架构式结构, 并搭载合适的硬件。NVIDIA Jetson TX2 开发板处理图像得到机器人相对于对缝的位姿, 通过串口传输到 STM32 单片机中, 进而控制机器人自主调姿。

(2) 基于双线结构光与对缝的相对位置关系, 将图像中光条检测到对缝的情况分为双缝、单缝和无缝 3 种, 提出了机器人在不同情况下的自主调姿方法, 解决了机器人在运动过程中与对缝产生偏差时的自主调姿问题。

机器人通过该方法自主跟踪对缝。通过试验表明, 移动机器人对缝跟踪时的位置误差为 5.81mm, 角度误差为 3.52°。该机器人对缝跟踪误差小, 可靠性高, 为大型飞机蒙皮上表面装配对缝的自动化测量提供了新手段。

参考文献

[1] 马张健. 飞机蒙皮接缝信息自动提取技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
 MA Zhangjian. Study of the aircraft skin information automatic extraction [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[2] 严成, 黄翔, 李泷泉, 等. 基于三维激光扫描的蒙皮对缝检测研究 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 70-74, 78.
 YAN Cheng, HUANG Xiang, LI Shuangqao, et al. Research on detection of skin seam based on 3D laser scanning [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 70-74, 78.

[3] 丁祖娇. 面向结构光对缝测量的光条细化方法 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

DING Zujiao. Research on light stripe thinning method in seam measurement using structured light [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[4] 刘巨强, 钱丰. 关于塞尺测量方法的探讨 [J]. 电子质量, 2014(2): 6-8.

LIU Juqiang, QIAN Feng. Discussion about the measuring method of feeler gauge [J]. Electronics Quality, 2014(2): 6-8.

[5] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册—飞机装配 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.

Aeronautical Manufacturing Engineering Handbook Editorial Board. Aeronautical Manufacturing Engineering Handbook—Aircraft Assembly [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.

[6] 王志江, 薛坤喜, 吴定勇, 等. 基于视觉传感的机器人焊缝纠偏控制系统 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 48-55.

WANG Zhijiang, XUE Kunxi, WU Dingyong, et al. Robotic weld seam correction control system based on visual sensing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 48-55.

[7] 许大帅, 杜福洲. 基于线结构光的飞机蒙皮对缝阶差与间隙测量技术研究 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 77-81.

XU Dashuai, DU Fuzhou. Research on measurement technique of the stepped difference and gap between aircraft skins based on linear structural light [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 77-81.

[8] MUELLER E M, STARNES S, STRICKLAND N, et al. The detection, inspection, and failure analysis of a composite wing skin defect on a tactical aircraft [J]. Composite Structures, 2016, 145: 186-193.

[9] 冷雪峰. 基于 PID 的 STM32 智能小车机器人的设计 [J]. 自动化技术与应用, 2016, 35(11): 122-127.

LENG Xuefeng. Design of STM32 intelligent car robot based on PID [J]. Techniques of Automation and Applications, 2016, 35(11): 122-127.

[10] ZHONG C Q, GAO Z, WANG X, et al. Structured light three-dimensional measurement based on machine learning [J]. Sensors, 2019, 19(14): 3229.

[11] 任毅. 单片机常用接口通信技术 [J]. 电子技术与软件工程, 2018(9): 244.

REN Yi. Single-chip microcomputer interface communication technology [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(9): 244.

[12] HE C Q, WU D, CHEN K, et al. Analysis of the Mecanum wheel arrangement of an omnidirectional vehicle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(15): 5329-5340.

[13] 毛志伟, 周少玲, 赵滨, 等. 双线激光传感焊枪定位与焊缝走向识别 [J]. 焊接学报, 2015, 36(2): 35-38, 114-115.

MAO Zhiwei, ZHOU Shaoling, ZHAO Bin, et al. Welding torch position and seam orientation deviation based on two stripes laser vision sensing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(2): 35-38, 114-115.

[14] HANG H Q, WU D D, YAO T. Research on AGV trajectory tracking control based on double closed-loop and PID control [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1074: 012136.

通讯作者: 黄翔, 教授, 博士, 研究方向为飞机装配与数字化测量, E-mail: xhuang@nuaa.edu.cn.

(责编 阳光)